

ESTRATEGIA PARA OPTIMIZAR LA CONVERSIÓN DE UNA ESTACIÓN EÓLICA AISLADA CON BANCO DE BATERÍAS

M. G. Cendoya¹, G. M. Toccaceli²

Laboratorio de Electrónica Industrial, Control e Instrumentación (LEICI)
Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de La Plata, C.C. 91, C.P. 1900 – La Plata, Argentina.
TEL / FAX: (0221)-4259306 e-mail: cendoya@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN: Los sistemas de conversión de energía eólica (SCEE) aislados (sin conexión a la red) de baja potencia y de uso corriente, utilizan un generador sincrónico de imanes permanentes que alimenta un puente rectificador no controlado, para cargar un banco de baterías mediante un convertidor CC-CC intermediario. Para estado estacionario, en este tipo de sistemas existe un valor del ciclo de trabajo del convertidor, distinto para cada velocidad de viento y estado de carga de las baterías, que lleva al SCEE a operar en su punto óptimo de conversión. Los cálculos para determinar este ciclo de trabajo involucran expresiones matemáticas complejas. Este trabajo presenta una estrategia de operación del SCEE cuya implementación práctica es sencilla y se puede llevar a cabo con un procesador de bajo costo. Los cálculos complejos se realizan en la etapa de implementación del sistema, y el resultado de los mismos es colocado en una memoria fija reprogramable para su utilización en tiempo real o de operación. Para extraer el valor del ciclo de trabajo óptimo desde dicha memoria, solo se requieren como datos de entrada la velocidad de rotación de la turbina y la tensión del banco de baterías. El análisis y evaluación de la estrategia de operación propuesta se realizó por simulación, empleando un sistema SCEE típico que permitió corroborar la validez de la propuesta.

Palabras clave: Energía eólica, Sistemas de Conversión Aislados, Banco de Baterías.

INTRODUCCIÓN

En zonas rurales alejadas de los grandes centros urbanos, los sistemas de conversión de energía eólica (SCEE) aislados (no conectados a la red de distribución de energía eléctrica) se presentan como una solución muy atractiva para el suministro de energía eléctrica. Un SCEE autónomo de baja potencia típico, se encuentra formado por una turbina eólica, un generador eléctrico, un rectificador no controlado, un convertidor CC-CC y un banco de baterías para el almacenamiento de la energía. Usualmente se incorpora además un inversor, para alimentar equipos domésticos que requieren tensión alterna sinusoidal. El diagrama en bloques del SCEE autónomo se muestra en la Fig. 1.

El tipo de turbina eólica normalmente utilizada es la de eje horizontal (TEEH) de tres palas y paso fijo. El generador eléctrico mas difundido es del tipo sincrónico de imanes permanentes (GSIP) trifásico, multipolar y rotor liso. El rectificador es un puente completo de diodos y el convertidor CC-CC normalmente es del tipo de una sola llave (reductor, elevador o reductor-elevador).

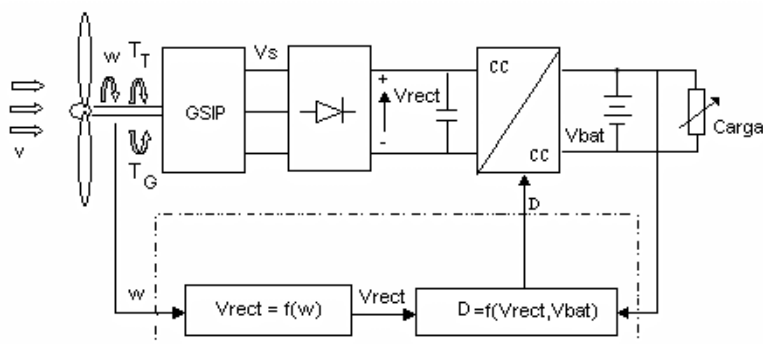


Fig.1 SCEE autónomo típico.

En un sistema como éste, la única variable de accionamiento disponible es el ciclo de trabajo (D) del convertidor CC-CC. Como la batería impone la tensión de salida del convertidor CC-CC, lo que realmente se está haciendo es fijar la tensión a la salida del rectificador (V_{rect}) para un dado D . A su vez, fijar V_{rect} implica imponer la tensión alterna en bornes del generador. Trabajos existentes (Drouilhet, 1995), muestran que, para cada velocidad de viento, existe un valor de V_{rect} que hace que el

generador presente a la turbina una cupla resistente tal que la misma opere en su punto de máxima potencia. También es posible variar D para regular la carga de la batería, prolongando su vida útil.

^{1,2} Profesor Adjunto UNLP Profesional Principal CONICET.

En este trabajo se muestra una estrategia de operación del SCEE para que trabaje en máxima generación. Se miden la velocidad de rotación de la turbina ω y la tensión del banco de baterías V_{bat} , y se determina el ciclo de trabajo D del convertidor para que su entrada presente la V_{rect} que lleva al sistema a operar en su punto óptimo. Para que la implementación de la estrategia resulte simple, todos los cálculos involucrados se realizan durante el tiempo de diseño (*off-line*) y los resultados se almacenan en una memoria reprogramable. Esto facilita posibles futuras modificaciones, necesarias cuando cambian los valores de los parámetros del sistema, y fundamentalmente permite simplificar el procesamiento durante el tiempo de operación (*on-line*). Además, como no se necesitan cálculos *on-line*, en el procesamiento *off-line* se pueden utilizar complejos y precisos modelos matemáticos para cada uno de los componentes del sistema. Esto último redundará en una mayor precisión de los valores del ciclo D calculados y a emplear en la operación *on-line* del sistema.

ANÁLISIS DEL SISTEMA

En esta sección se presentan los modelos matemáticos de cada uno de los subsistemas que componen al SCEE, utilizados en el trabajo.

Característica cupla-velocidad de la turbina eólica.

Como se mencionó en la introducción, se tratará el caso de turbinas eólicas de eje horizontal (TEEH) y paso fijo (Wood, 2002). Una turbina eólica es caracterizada por el coeficiente adimensional de performance C_p , que representa la fracción de potencia que la misma extrae del viento. Para turbinas con palas de paso fijo, C_p (también conocido como coeficiente de potencia) depende sólo de λ , que es la relación entre la velocidad de punta de pala de la turbina y la velocidad del viento:

$$\lambda = \frac{r\omega}{v} \quad (1)$$

donde:

- r : radio de las palas de la turbina [m].
- ω : velocidad de rotación de la turbina [rad/s].
- v : velocidad del viento [m/s].

Si bien C_p es normalmente provista por el fabricante en forma gráfica ó de tabla, para realizar cálculos se suelen utilizar expresiones matemáticas que aproximan la curva $C_p(\lambda)$, por ejemplo con polinomios u otras funciones. La potencia capturada por una turbina eólica puede expresarse entonces como:

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda) v^3 \quad (2)$$

donde:

- ρ : densidad del aire, depende de la altura y la temperatura, valor típico 1,225 [Kg./m³].
- $A = \pi r^2$: área frontal de la turbina [m²].

La cupla producida por la turbina eólica, se puede obtener dividiendo la Ec. 2 por la velocidad de rotación, y resulta:

$$T_T = \frac{1}{2} \rho A r C_T(\lambda) v^2 \quad (3)$$

donde $C_T(\lambda)$ es el coeficiente de cupla dado por:

$$C_T(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad (4)$$

Para cada turbina eólica existe un valor máximo de C_p (<0.593 , *Límite de Betz*), que se da para un valor particular de λ , al que denominaremos λ_o . Entonces, para maximizar la potencia extraída por la turbina se debe trabajar con λ_o , es decir a una velocidad de rotación óptima para cada velocidad de viento. El lugar geométrico de los puntos del plano cupla-velocidad para los cuales la potencia de la turbina es máxima, es una parábola. Combinando (1) y (3), se obtiene:

$$T_{P_{\max}}(\omega) = k_T \omega^2 \quad (5)$$

con:

$$k_T = \frac{1}{2} \rho A r^3 \frac{C_{P_{\max}}}{\lambda_o^3} \quad (6)$$

Característica cupla-velocidad del Generador Sincrónico de Imán Permanente (GSIP), $T_G(\omega)$

Se considera un GSIP trifásico, multipolar, de rotor liso, flujo radial y además se supone que la distribución de campo en el entrehierro es cuasi-sinusoidal. Los bobinados estatóricos del GSIP están en conexión estrella y alimentan a un puente rectificador trifásico no controlado. En estas condiciones, la componente fundamental de la corriente estará en fase con la componente fundamental de la tensión fase-neutro. Esto implica que se puede considerar una carga resistiva equivalente. El circuito equivalente por fase del GSIP y su correspondiente diagrama fasorial se muestran en la Fig. 2.

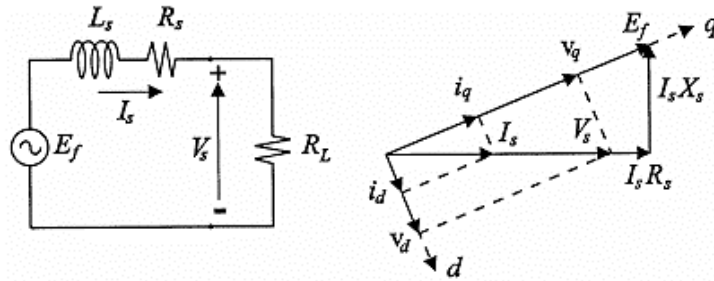


Fig. 2. Circuito equivalente por fase del GSIP y diagrama fasorial.

En la Fig. 2 R_s es la resistencia estatórica, L_s es la inductancia sincrónica estatórica, I_s es la corriente de fase y V_s es la tensión de fase en terminales del generador. E_f es la f.e.m. inducida en el bobinado estatórico y vale:

$$\hat{E}_f = \phi \omega_e \quad (7)$$

donde:

Φ : flujo concatenado por el estator.

$\omega_e = \frac{P}{2} \omega$: veloc. angular eléctrica.

P : número de polos.

El modelo dinámico del GSIP en un marco de referencia rotórico dq, asumiendo que no existen cantidades de secuencia 0 y rotor liso ($L_d=L_q=L$), es (Krause, 1986):

$$\begin{aligned} \frac{di_q}{dt} &= -\frac{R_s}{L} i_q - \omega_e i_d + \frac{\omega_e \phi}{L} - \frac{v_q}{L} \\ \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R_s}{L} i_d - \omega_e i_q - \frac{v_d}{L} \\ T_G &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \phi i_q \end{aligned} \quad (8)$$

La expresión exacta de $T_G(\omega_e)$ se obtiene de la Ec. 6, igualando las derivadas a cero (estado estacionario), despejando i_q y reemplazando en la ecuación de la cupla. Resulta:

$$T_G = \frac{3}{2} \frac{P}{\omega_e} \frac{1}{2} \left\{ \frac{\hat{V}_s \sqrt{E_f^2 (R_s^2 + X_s^2) - \hat{V}_s^2 X_s^2 - \hat{V}_s^2 R_s}}{R_s^2 + X_s^2} + \frac{R_s \left[\sqrt{E_f^2 (R_s^2 + X_s^2) - \hat{V}_s^2 X_s^2 - \hat{V}_s^2 R_s} \right]^2}{(R_s^2 + X_s^2)^2} \right\} \quad (9)$$

donde: $X_s = \omega_e L_s$ (10)

Modelo del puente rectificador

La mayoría de los trabajos que analizan SCEE en carga de baterías (Drouilhet, 1995) (Muljadi, 1996) (Martínez, 2005), utilizan una expresión de la relación de conversión para el puente rectificador trifásico que es válida para el caso de un rectificador alimentado por un generador de CA de tensión ideal y una carga de tipo corriente constante. Por ejemplo, cuando se utiliza un inductor de alisamiento a la salida del rectificador que se alimenta desde la red (Mohan, 1995). Sin embargo el puente rectificador trifásico del SCEE tiene por carga al convertidor CC-CC, es decir tiene una carga de tipo tensión constante y además la inductancia sincrónica del GSIP tiene un valor relativo importante por lo que su efecto no puede despreciarse. Una expresión más ajustada al caso tratado (Caliskan, 2003) es:

$$\hat{V}_s = \frac{2}{\pi} (V_{rect} + 2V_d) = 0.6366 (V_{rect} + 2V_d) \quad (11)$$

donde:

V_{rect} : tensión media de salida del rectificador.

V_d : caída de tensión directa en los diodos.

Modelo del convertidor CC-CC

El convertidor de CC-CC tiene por carga a la batería, por lo tanto su tensión de salida será constante y estará fijada por el estado de carga de la batería. Suponiendo un convertidor CC-CC ideal (sin pérdidas) y operación en modo de conducción continua (MCC) la tensión de entrada del convertidor está vinculada con la de la batería a través de la relación de conversión $M(D)$:

$$\frac{V_{bat}}{V_{rect}} = M(D) \quad (12)$$

$M(D)$ es una función del ciclo de trabajo D y es diferente para cada topología de convertidor (Mohan et al, 1995):

$$M(D) = \begin{cases} D & \text{reductor} \\ \frac{1}{1-D} & \text{elevador} \\ \frac{D}{1-D} & \text{reductor-elevador} \end{cases} \quad (13)$$

ESTRATEGIA DE OPERACIÓN E IMPLEMENTACIÓN.

La ecuación mecánica que describe la evolución temporal de la velocidad mecánica de rotación de la turbina, es:

$$T_T - T_G = B\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (14)$$

donde:

T_T : cupla motriz producida por la turbina.

T_G : cupla resistente presentada por el GSIP.

B : fricción viscosa del conjunto turbina-GSIP.

J : momento de inercia del conjunto turbina-GSIP.

Despreciando el efecto del rozamiento ($B=0$), los puntos de operación en estado estacionario del conjunto Turbina Eólica - GSIP se obtienen cuando se igualan ambas cuplas. Este punto corresponde a la intersección de las curvas características de la Turbina y del GSIP en el plano cupla-velocidad. Si se pretende trabajar en el punto de máxima potencia se debe encontrar el valor de V_{rect} que hace que el GSIP intercepte a la curva de la turbina en los puntos dados por la Ec. 5.

En la etapa de diseño, con cálculos *off-line* y a partir del conocimiento del valor de la velocidad de rotación ω discretizada, obtenemos de las expresiones (5) y (9) la tensión media de salida del rectificador V_{rect} necesaria para que el sistema trabaje en el punto óptimo de conversión de estado estacionario. El valor de V_{bat} y V_{rect} discretizados permite calcular, mediante la expresión (13) el ciclo de trabajo D discretizado necesario para esta condición de operación.

Pudiéndose obtener de la forma planteada previamente, los valores de D exactos para un dado par de valores discretos (ω , V_{bat}), la implementación del accionamiento del sistemas se realizará mediante una memoria reprogramable en la que se cargan, bajo la forma de Look-up Table (LUT), los valores de D calculados *off-line*. Para la operación *on-line* del sistema, los valores de D serán extraídos de dicha tabla mediante un direccionamiento formado por los pares de valores discretos (ω , V_{bat}) medidos

Cuantificando cada una de las magnitudes ω y V_{bat} en 256 valores distintos, podemos utilizar una palabra de 16 bits conformada en su parte alta por la representación en 8 bits de ω y en la parte baja por la representación en 8 bits de V_{bat} para obtener la dirección de memoria que contiene el valor digital del ciclo de trabajo D correspondiente a dichos valores, según Fig.3.

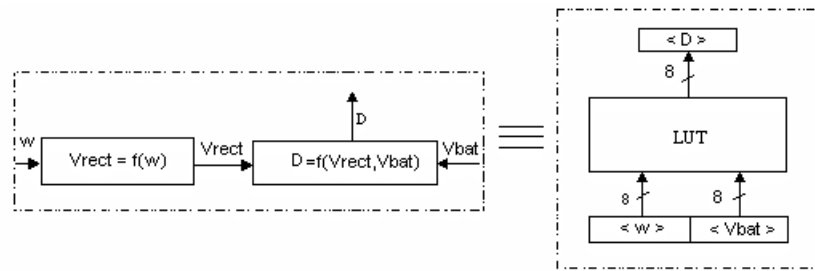


Fig. 3. Conformación de la dirección de la memoria reprogramable

A partir de lo propuesto, el sistema final podrá estar conformado por un microcontrolador, como dispositivo dedicado, cuyas líneas de entrada / salida permiten medir y actuar sobre el dispositivo a controlar. Un conversor A/D presente en el micro, permitirá obtener un valor digital en 8 bits de la V_{bat} , mientras que mediante Timers internos se podrá medir la velocidad angular a partir de pulsos provenientes de un encoder. Conformada la dirección de acceso a la EEPROM externa como se explicara anteriormente, a través de una operación de lectura se obtendrá el valor correspondiente de D para generar el tren de pulsos PWM a través del correspondiente controlador que opera al convertidor CC/CC. Esta estructura digital también puede ser realizada con el uso de un dispositivo FPGA, implementando en el mismo una máquina de estados, memoria y conversores externos.

EVALUACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE OPERACIÓN PROPUESTA.

La evaluación de la estrategia de operación propuesta se realizó a través de un estudio efectuado mediante simulación. Para ello se considera un SCEE autónomo ejemplo de una potencia nominal de 1.5KW para un viento de $v=12\text{m/s}$. A continuación se detallan los datos característicos de los distintos subsistemas que componen el SCEE.

Turbina: Tipo TEEH de 3 palas y paso fijo, con: $R=1\text{m}$ y $\rho=1.2242 \text{ Kg. /m}^3$. La misma está caracterizada por el coeficiente de potencia que se muestra en la Fig. 4. La expresión matemática de ajuste de esta curva esta dada por (MATLAB-Simulink, 2006):

$$C_p(\lambda) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda} - c_3 \right) e^{\frac{-c_4}{\lambda}} + c_5 \lambda \quad (15)$$

donde:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda} - 0.0035 \quad c_1=0.5176; \quad c_2=116, \quad c_3=5, \quad c_4=21 \quad \text{y} \quad c_5=0.0068.$$

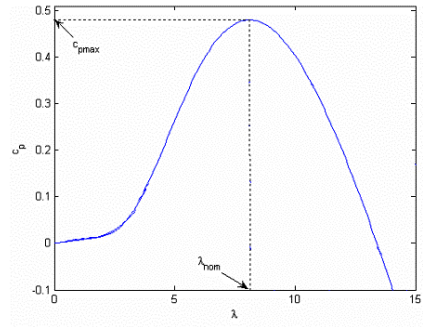


Fig. 4. Curva de C_p en función de λ .

En la Fig. 4, se vé que al valor de $C_{pmax}=0.48$ le corresponde un $\lambda_o=8.1$.

Generador: GSIP trifásico, multipolar, rotor liso, y estator conectado en estrella. Los parámetros del mismo se muestran en la Tabla 1:

P	8
Φ	0.23Wb
R_s	0.51 Ω
L_s	3.3mH
J	1.964 K-m ²
B	1.53x10 ⁻³ N-m-s

Tabla 1. Características del GSIP.

Rectificador: trifásico en puente completo con diodos de Si con $V_d=0.8V$.

Convertidor CC-CC: se considera un convertidor tipo reductor.

Banco de Baterías: de plomo-ácido y tensión nominal de 48V.

Se realizaron simulaciones en ambiente MATLAB-Simulink para determinar los puntos de operación del SCEE, suponiendo vientos estacionarios en el rango de 4 a 14m/s y banco de baterías con tensión nominal. Para disminuir el tiempo de simulación se utilizó un modelo promediado del convertidor conmutado CC-CC .

La Fig. 5 muestra los puntos de trabajo del sistema para cada velocidad de viento, juntamente con la característica cupla-velocidad del generador.

En la Tabla 2 se muestran los valores de V_{rect} , D , T_T , ω correspondientes a los puntos de operación de equilibrio del SCEE y la potencia resultante para cada velocidad de viento. Del análisis de los resultados obtenidos se desprende que con el valor de D que resulta de aplicar la estrategia, la potencia obtenida para cada velocidad de viento es la máxima posible (calculada mediante (5)).

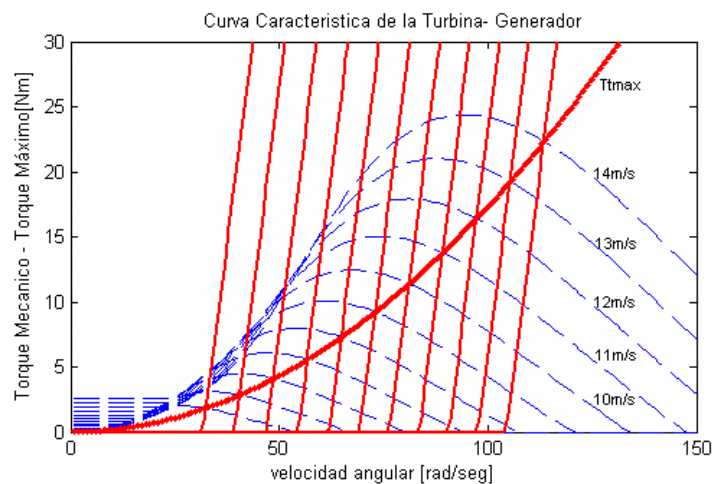


Fig. 5. Puntos de operación del SCEE. T_T para diferentes v y característica $T_G(\omega)$.

v [m/s]	V_{rect} [V]	D	T_r [Nm]	ω [r/s]	P_{max} [W]
4	46.10	1.000	1.82	32.41	59.08
5	57.25	0.838	2.84	40.51	115.37
6	68.00	0.706	4.10	48.60	199.35
7	78.35	0.612	5.58	56.71	316.61
8	88.20	0.544	7.29	64.82	472.60
9	97.55	0.492	9.22	72.93	922.78
10	106.50	0.450	11.37	81.16	922.78
11	114.45	0.419	13.78	89.16	1228.62
12	122.00	0.393	16.41	97.20	1595.05
13	128.75	0.372	19.25	105.30	2027.02
14	134.70	0.356	22.32	113.48	2532.87

Tabla 2. Puntos de operación del SCEE ($V_{bat}=12V$).

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una estrategia de operación de una estación de conversión eólica-eléctrica aislada con banco de baterías, con el objetivo de optimizar su operación. La misma posee las siguientes características:

- Se analiza la estructura de SCEE de baja potencia más difundida:
TEEH tripala de paso fijo;
GSIP trifásico, multipolo y de rotor liso;
Puente rectificador trifásico no controlado;
Convertidor CC-CC de una sola llave;
Banco de baterías.
- Se utiliza un modelo completo representar la característica del generador.
- El modelo del rectificador trifásico utilizado se ajusta mejor a la condición real de operación (carga con tensión constante) con respecto al modelo utilizado en otros trabajos (carga con corriente constante).
- Para aplicar la estrategia solo se necesitan conocer algunos parámetros del sistema y medir la velocidad de rotación de la turbina y la tensión del banco de baterías.
- Los cálculos para determinar el valor de la variable de accionamiento (ciclo de trabajo del convertidor) se realizan *off-line* y los resultados tabulados se almacenan en una memoria reprogramable para su uso en operación de tiempo real u *on-line*.
- Resulta una operación e implementación simple y de bajo costo, ya que solo se requiere un moderado poder de cómputo (un procesador digital de bajas prestaciones).
- La estrategia de operación propuesta fue verificada mediante simulación. La potencia asociada al punto de operación que resulta de aplicar la misma, es la máxima posible para el caso estudiado y analizado.

REFERENCIAS

- Caliskan, V., D.J. Perreault, T.M. Jahns, and J.G. Kassakian, (2003), "Analysis of three-phase rectifiers with constant-voltage loads", *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, Vol. 50, No. 9, pp. 1220–1225.
- Drouilhet S., E. Muljadi, R. Holz and V. Gevorgian, (1995), "Optimizing small wind turbine performance in battery charging applications", *25th Annual Conference and Exhibition on Wind Power (Windpower '95)*, Washington, DC.
- Krause, P., O. Wasynczuk and S. D. Sudhoff, (1995), *Analysis of Electric Machinery*, IEEE Press, Piscataway, NJ.
- Martínez, J., A. Morales, O. Probst, A. Llamas and C. Rodríguez, (2005), "Analysis and simulation of a wind-electric battery charging system", *International Journal of Energy Research*, Wiley Interscience, Published online, DOI: 10.1002/er.1175.
- MATLAB-Simulink®, (2006), "*SimPowerSystems Toolbox*", The MathWorks Inc.
- Mohan, N., T.M. Undeland and W.P. Robbins, (1995), *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons, New York.
- Muljadi, E.; S. Drouilhet, R. Holz and V. Gevorgian, (1996), "Analysis of permanent magnet generator for wind power battery charging", *Industry Applications Conference (IAS '96)*, Vol. 1, pp.541-548.
- Zinger, D.S.; Muljadi, E.; Miller, A., (1996), "A simple control scheme for variable speed wind turbines", *IEEE Industry Applications Conference IAS '96*, Vol. 3, pp. 1613 – 1618.
- Valenciaga, F., P.F. Puleston, P.E. Battaiotto and R.J. Mantz, (2000), "Passivity/sliding mode control of a stand-alone hybrid generation system", *IEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 147, No. 6, pp. 680-686.
- Wood, D., (2002), *The Design and Analysis of Small Wind Turbines*, 1st Edition, School of Engineering, University of Newcastle, NSW2308, Australia.
- Knight, A., and G.E. Peters, (2005), "Simple wind energy Controller for an expanded operating range", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 2.
- De Broe, A., S. Drouilhet and V. Gevorgian, (1999), "A peak power tracker for small wind turbines in battery charging applications", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 4.
- Yamamura, N., M. Ishida and T. Hori, (1999), "A simple wind power generating system with permanent magnet type synchronous generator", *IEEE Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems (PEDS'99)*, Hong Kong.

ABSTRACT

Low power autonomous wind energy conversion systems (WECS) usually contains a permanent magnet synchronous generator (PMSG) that feeds a non controlled bridge rectifier. A battery bank is charged with an intermediary DC-DC converter. On this kind of systems the optimal conversion point (maximum power) can be identified through a particular duty-cycle value of the DC-DC converter for each wind speed and battery state of charge. Computing this duty-cycle value involve complex mathematical expressions. This work presents a strategy of operation of the SCEE whose practical implementation is very simple and it is possible to be carried out with low cost processor, since the calculations are made off-line and the result of such is stored in a reprogrammable memory. In order to extract the optimal value of the duty-cycle, the only data required are the rotation speed of the turbine and the battery bank voltage. In order to evaluate the performance of the proposed operation strategy, an SCEE example is considered and it is studied by computer simulation. The results corroborate the validity of the proposed strategy.

Keywords: Wind Energy, Autonomous Conversion System, Operation strategy.